

# 地山のせん断変形を想定した山岳トンネルの覆工破壊時の荷重に関する検討

国立研究開発法人 土木研究所 正会員 岸田 展明, 日下 敦, 砂金 伸治

## 1. はじめに

山岳トンネルは, 特殊な条件を除き, 一般に地震に強い構造物とされてきた. しかしながら, 近年の地震でトンネル坑口部以外の一般部でも覆工の崩落を伴うような被害を受けた山岳トンネルが存在することから, 合理的な耐震対策工の検討が課題となっている.

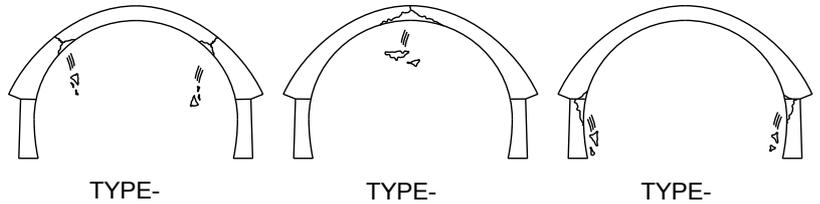


図-1 トンネルの地震被害モード

これまでの地震による山岳トンネルの被害は, 地質の急変部にトンネルが位置するなどの特殊な条件を除けば, 大まかに図-1の三種類に大別されると考えられている<sup>1)</sup>. TYPE-Iは, 肩部に曲げ圧縮破壊や曲げ引張りひび割れが発生するケース, TYPE-IIは天端部に圧縮破壊が発生するケース, TYPE-IIIは側壁部に圧縮破壊が発生するケースである. これらの被害が発生するメカニズムは必ずしも解明されていないが, TYPE-I~IIIの被害は, それぞれ地山のせん断変形, 水平圧縮変形, 鉛直圧縮変形により再現できる可能性があることが指摘されている<sup>1)</sup>.

既往の研究<sup>1)</sup>では, TYPE-IIは地山の水平圧縮変形, TYPE-IIIは地山の鉛直圧縮変形で再現できることが確認されており, 本研究は, 肩部に曲げ圧縮破壊や引張りひび割れが発生するTYPE-Iの被害を再現解析を行い, 破壊が生じる外力を静的荷重に換算した場合の荷重の大きさについて検討を行った.

## 2. 数値解析の概要

数値解析は非線形解析における解の収束において比較的有利な有限差分法によるものとし, 本研究ではFLAC3Dを使用した. 解析モデルの概要を図-2に示す. トンネルの直径(覆工の外径)Dは10mとし, 上半は半径R=5mの単心円, 下半半径は2Rとした. 覆工の厚さは30cmとした. 本研究では, インバートを設置しない場合と設置する場合について検討を行い, 設置する場合においては, インバートの半径は2R, 厚さは50cmとした. なお, インバートを設置する場合においても, すり付け部は設けていない. 解析領域は, トンネル上部, 下部, 側部とも2Dとした. 境界条件は下端を拘束, 左右端は水平ローラー, 上端に水平荷重を載荷することで, 地山のせん断変形をモデル化した. また, 奥行き方向は変位を拘束し平面ひずみ状態とした. 解析モデルはすべてソリッド要素とした. 覆工およびインバートにおけるメッシュサイズは5cm程度を基本とし, 厚さ方向は6分割, 周方向は1°ピッチ, 奥行き方向は1分割とした. 本研究での解析物性値を表-1に示す. 地山は弾性体と仮定し, 比較的良好な地山としてCII, 軟質な地山としてDII, さらに軟質な地山としてEの3種類を設定した. 覆工およびインバートは, ひずみ軟化特性を考慮できる非線形モデルを適用した<sup>1)</sup>.

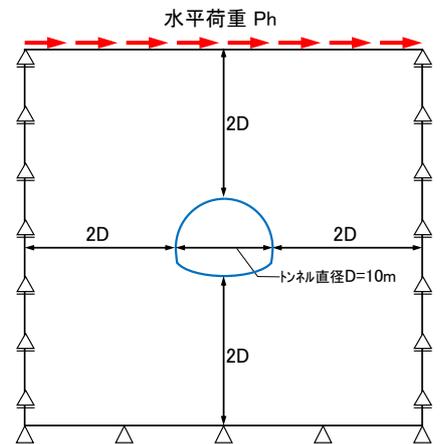


図-2 解析モデル概要

表-1 解析物性値

| モデル   | ヤング係数 (MPa) | ポアソン比      |
|-------|-------------|------------|
| 地山    | CII         | 1,000 0.30 |
|       | DII         | 150 0.35   |
|       | E           | 50 0.40    |
| 覆工    | 22,000      | 0.20       |
| インバート |             |            |

## 3. 解析結果

図-3は地山に作用する水平荷重 $P_h$ と覆工天端部の変位の関係を示したもので, 内空側への変位を正とした. CII, DII地山においては, インバート設置の有無に関わらず載荷荷重がそれぞれ1.1MPa, 0.6MPaを超えたところで変位の急変が確認できた. この変位の急変

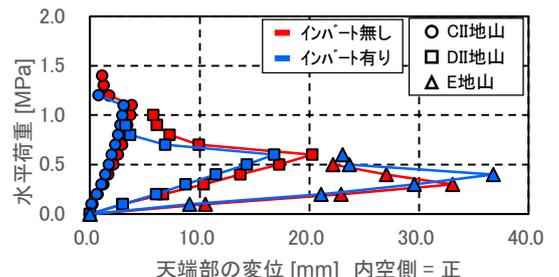
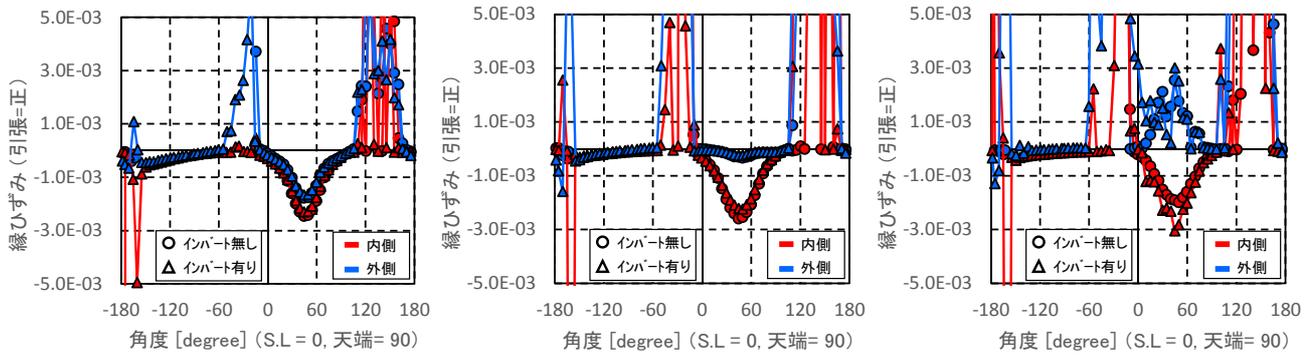


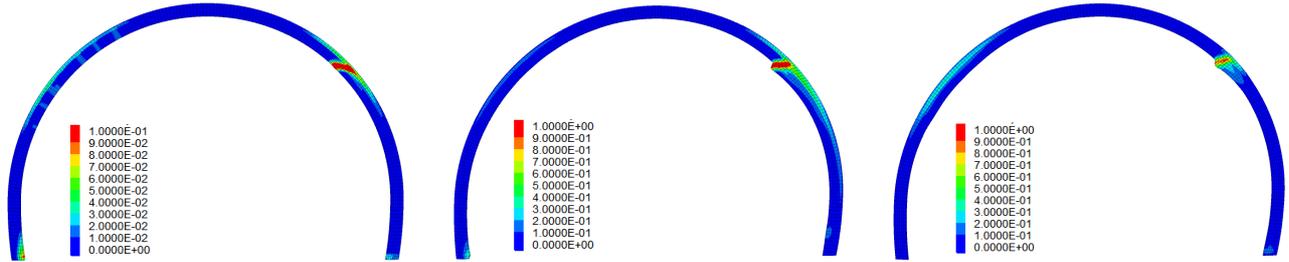
図-3 覆工の荷重-変位曲線

キーワード 山岳トンネル, 地震, 覆工, 数値解析

連絡先 〒305-8516 つくば市南原 1-6 (国研)土木研究所 道路技術研究グループ(トンネル) TEL 029-879-6791



(1) CII 地山 (2) DII 地山 (3) E 地山  
 図-4 覆工破壊直前における覆工表面の周方向ひずみ分布



(1) CII 地山 (2) DII 地山 (3) E 地山  
 図-5 覆工の最大せん断ひずみ分布

が生じる直前の覆工表面の周方向ひずみ分布を図-4(1),(2)に示す。この時点で覆工の肩部(40~50°付近)において2,500μを超える圧縮ひずみが確認された。インバートを設置した場合には、覆工肩部の圧縮ひずみに加えて覆工とインバートの接続部においても突出した圧縮ひずみが確認された。次の荷重ステップではともに圧縮ひずみが急激に増大し、変位も急増した。ただし、覆工とインバートの接続部については、解析上ですりつけを設けていないため、局所的に応力集中が生じた可能性も考えられる。一般に実構造物ではインバートの変状状態を確認するには多大な労力を要することから、解析結果の妥当性を検証することが困難であり今後の課題である。変位の急変

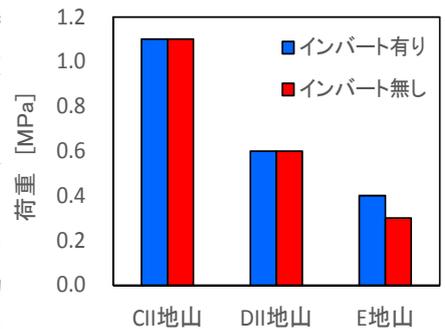


図-6 覆工破壊時の地山の荷重

時における覆工の最大せん断ひずみ分布(図-5(1),(2))からも、覆工肩部においてひずみが卓越していることが確認できた。既往の研究<sup>1)</sup>と同様に、このような現象を覆工の圧縮破壊とし、その際の荷重を覆工破壊時の荷重と定義した。E地山においても、図-4(3),5(3)からCII,DII地山と同様に覆工肩部で圧縮破壊が生じていることが確認できた。以上から、覆工破壊時の荷重を図-6に示す。覆工破壊時の作用荷重は地山状況により異なり、CII地山で1.1MPa,DII地山で0.6MPa,E地山で0.3~0.4MPaであった。換言すれば、E地山のように軟質地山でインバートが設置されていない場合には、0.3MPa相当以上の荷重、すなわち地山の単位体積重量を23kN/m<sup>3</sup>とすると、トンネル上方に1Gの加速度で約1.3D以上の土被りに相当する荷重が地山の水平方向に作用することで覆工肩部に圧縮破壊が生じると言える。

4. まとめ

地震時の山岳トンネルの被害として、覆工肩部の破壊を再現する解析を行い、破壊が生じる外力を静的荷重に換算した場合の荷重の大きさについて検討を行った。その結果、覆工肩部の破壊を数値解析で再現することができ、破壊時の荷重を想定することができた。今後、実現象との比較や実験を通じた検証等により、本検討結果の妥当性を確認したいと考えている。

参考文献

1) 日下敦, 河田皓介, 砂金伸治: 山岳トンネルにおける地震時の変形モードと作用荷重に関する一考察, 岩盤力学に関するシンポジウム講演集, No.44, pp.301-304, 2015